

学校编码: 10384

分类号

密级

学号: 200329011

UDC

厦门大学

硕士学位论文

杆件电弧焊过程的计算机辅助分析

Computer-aided Numerical Analysis of
the Arc Welding Process for the Pole-structure

戴倩

指导教师姓名: 林麒 教授

专业名称: 测试计量技术与仪器

论文提交日期:

论文答辩时间:

学位授予日期:

答辩委员会主席:

评阅人:

2006 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（√）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

由于焊接技术在工业中的应用日益广泛，对焊件质量的要求也越来越高，杆件的焊接加工量很大，但存在诸多技术问题亟待解决。在焊接的实测研究在技术上仍存在较大难度的情况下，数值分析模拟不失为一种可取的研究手段。针对当前对杆件焊接的数值模拟还比较少，本文对以 A3 钢为材料的杆件对接焊过程进行了有限元仿真。

本文采用大型通用有限元分析软件 ANSYS，用参数化命令流方式编程，对焊接模型进行实体建模，并通过网格控制对其进行不均匀网格划分以形成合理的有限元网格模型。由于高温时材料属性参数的数据较为欠缺，本文以经验公式为基础求得材料各参数随温度变化的曲线，同时引入热焓值模拟焊接过程中的熔融相变现象，并采用双椭圆高斯面热源和双椭球体热源共同加载来模拟焊接时的移动热源，对焊接过程进行瞬态温度场分析以及热弹塑性结构分析。

本文分别采用直接耦合法和间接耦合法对杆件焊接过程进行热-结构耦合分析。结果表明，在焊接过程中，温度场对结构场的影响起着主导作用，而结构场对温度场的影响非常小，可以忽略；在进行有限元分析时，对分析单元类型的选择得当与否将影响计算的收敛和结果。通过比较，发现对于与热塑性相关的问题不宜采用直接耦合法，故本文选用间接耦合法来求解杆件焊接问题，对焊接过程及冷却过程的温度场、应力场、结构变形的变化过程进行了三维实时动态模拟。

通过有限元仿真结果与实验结果的对比，二者在温度场的分布上基本吻合，在结构变形的变化趋势上也基本一致，由此可认为计算所得的应力分布即为焊件上的应力分布。本文的研究结果为杆件焊接的有限元分析提供了可行性依据，也为今后对杆件进行焊前、焊后处理等分析奠定了基础。

关键词：有限元分析；杆件焊接；热-结构耦合

ABSTRACT

Welding technology is used more and more widely in modern industrial manufacture, so that the quality to the welding workpiece is demanded much higher. Since the welding of pole-structure is huge in quantity and there are much technical problems to be solved, the welding procedure of the pole-structure made by A3 steel is analyzed in this paper by using FEM.

In the paper, the entities of the welding model are set up by APDL command in the universal FEM analysis software ANSYS. And the appropriate finite element model has been constructed by the non-uniform mesh. For the lacking of the material properties at high temperature, the experimental relations were adopted to describe the data varying with the temperature. The heat enthalpy was used to simulate the phase change during the welding. And the bi-ellipse Gauss and the bi-ellipse-sphere heat sources were applied to describe the moving welding heat source together. The numerical analyses of the transient heat process and the elastic-plastic structure have been carried out.

In accordance with the coupled-field function of ANSYS, the direct and sequential coupled methods were executed respectively to analyze the welding. The computational results show that the structure field is strongly influenced by the heat field, but weakly reversed. And the selection of the element type is important, because it will affect the convergence and the results. By contrasting the results from two coupled methods, the sequential coupled method is adopted finally to solve the welding problem. After calculating, the change of the temperature, stress and the structure deformation in three-dimension during welding have been simulated.

The comparison between the computational and experimental results shows that the temperature distributions and the trend of the deformation are nearly identical, and the stress computed can be accepted for the pole-structure during welding, which indicates the availability of the analytic method proposed in this paper. It establishes the foundation of the analysis to the pre-welding and post-welding treatments on the pole-structure.

Key Words: FEM; pole-structure welding; heat-structure coupled-field

目 录	
第一章 绪 言	1
§1.1 焊接加工技术发展概况及其特点	1
§1.2 焊接热过程对焊件的影响	2
§1.3 数值模拟技术及有限元法在焊接技术中的应用	3
§1.4 国内外在焊接方面的研究动态	5
§1.5 本文研究的意义与主要内容	7
第二章 焊接过程的数学描述	9
§2.1 有限元方法	9
§2.2 焊接传热的基本理论	9
§2.2.1 热传导	10
§2.2.2 热对流	11
§2.2.3 热辐射	12
§2.2.4 三类边界条件	13
§2.3 非线性瞬态温度场的有限元分析	13
§2.3.1 空间域的离散	14
§2.3.2 时间域的离散	15
§2.3.3 非线性瞬态热传导方程组的求解	16
§2.4 焊接过程的热弹塑性基础	17
§2.4.1 屈服准则	18
§2.4.2 流动法则	19
§2.4.3 强化准则	19
§2.5 焊接热弹塑性的有限元分析	20
§2.5.1 应力应变关系	20
§2.5.2 平衡方程	22
§2.5.3 热弹塑性问题的求解	23
§2.6 焊接热-结构场直接耦合分析	25
§2.7 本章小结	25

第三章 焊接分析模型的建立	27
§3.1 焊件问题的简化	28
§3.2 焊接杆件有限元模型的生成	30
§3.2.1 单元类型的选择	30
§3.2.2 实体模型网格化	32
§3.3 材料物性参数的确定	34
§3.4 热源载荷	38
§3.4.1 焊接热源的简化	38
§3.4.2 常用的热源数学模型介绍	38
§3.4.3 热源模型的选取	41
§3.5 载荷的施加	43
§3.5.2 边界条件及初始条件的施加	44
§3.6 求解设置	45
§3.7 本章小结	47
第四章 结果对比分析及方法改进	49
§4.1 直接、间接耦合计算结果的对比分析	49
§4.1.1 温度场分布对比	49
§4.1.2 应力场分布对比	52
§4.1.3 结构变形对比	57
§4.1.4 小结	59
§4.2 方法改进	59
§4.2.1 热源数学模型的改进	59
§4.2.2 热源加载方法的改进	63
§4.2.3 热源加载与节点的关系	63
§4.3 本章小结	64
第五章 实验与计算结果的对照分析	66
§5.1 焊接实验	66
§5.1.1 焊接杆件	66
§5.1.2 焊接实验器材	67

§5.1.3 实验过程及测量方法	68
§5.2 实验与仿真计算结果的比照	70
§5.2.1 焊接温度场分析	70
§5.2.2 焊接变形分析	74
§5.2.3 焊接应力场分析	77
§5.2.4 焊接残余应力与残余变形分析	80
§5.3 本章小结	81
第六章 结论与展望	83
§6.1 结论	83
§6.2 展望	85
参考文献	86
攻读学位期间发表的论文目录	89
致 谢	90

CONTENT

Chapter 1 Preface	1
§ 1.1 General developing situation of welding technology and its features.....	1
§ 1.2 The effect of the welding thermal process to the welded metal.....	2
§ 1.3 The application of the numarical simulation and FEM in welding	3
§ 1.4 The researchment to the welding at home and abroad	5
§ 1.5 The meaning and the main work in this paper	7
Chapter 2 Mathematical discription of the welding process	9
§ 2.1 The finite element method	9
§ 2.2 The main theories of the Heat conduction in welding	9
§ 2.2.1 Heat exchange	10
§ 2.2.2 Heat convection	11
§ 2.2.3 Heat radiation	12
§ 2.2.4 Three boundary conditions	13
§ 2.3 The FEM analysis of the nonlinear trainsient thermal field.....	13
§ 2.3.1 Dispersedness in space	14
§ 2.3.2 Dispersedness in time	15
§ 2.3.3 The solvement of the equations	16
§ 2.4 The thermal elastic-plastic foundation of the welding	17
§ 2.4.1 The yielding rule.....	18
§ 2.4.2 The flowage rule.....	19
§ 2.4.3 The hardening rule.....	19
§ 2.5 The FEM analysis of the thermal elastic-plastic in welding	20
§ 2.5.1 The relationship of stress and strain	20
§ 2.5.2 Balance equations.....	22
§ 2.5.3 The solution to the thermal elastic-plastic problem.....	23
§ 2.6 The direct thermal-structural coupled-field analysis.....	25
§ 2.7 Brief summary	25

Chapter 3 Construction of the analytical model for welding.....	27
§ 3.1 The simplification of the welding problem.....	28
§ 3.2 Construction of pole-structure FEM model.....	30
§ 3.2.1 Choosing of element types	30
§ 3.2.2 Meshing of the model	32
§ 3.3 Material properties.....	34
§ 3.4 Welding heat source.....	38
§ 3.4.1 Simplification of the heat source	38
§ 3.4.2 Introduction of the common mathematical heat source model	38
§ 3.4.3 Selection of the heat source model	41
§ 3.5 The application of the loads.....	43
§ 3.5.1 The application of the heat source	43
§ 3.5.2 The application of the boundary and initial conditions	44
§ 3.6 Setup of the solution	45
§ 3.7 Brief summary	47
Chapter 4 Contrast of results and the improvements.....	49
§ 4.1 Contrast of the direct and sequential coupled-field computation.....	49
§ 4.1.1 Contrast of the temperature	49
§ 4.1.2 Contrast of the stress	52
§ 4.1.3 Contrast of the deformation.....	57
§ 4.1.4 Summary.....	59
§ 4.2 Improvements of the analysis method	59
§ 4.2.1 Improvement of the heat source model	59
§ 4.2.2 Improvement of the loading	63
§ 4.2.3 The relationship of the loading and the nodes	63
§ 4.3 Brief summary	64
Chapter 5 Constrast of experimental and computational results	66
§ 5.1 Welding experiment.....	66
§ 5.1.1 Welding pole-structure.....	66

§ 5.1.2 Experimental equipments	67
§ 5.1.3 Procedure and the measurement	68
§ 5.2 Contrast of experimental and computational results.....	70
§ 5.2.1 Analysis of the welding temperature	70
§ 5.2.2 Analysis of the structure deformation.....	74
§ 5.2.3 Analysis of the welding stress	77
§ 5.2.4 Analysis of the residual stress and deformation	80
§ 5.3 Brief summary	81
Chapter 6 Conclusions and prospect.....	83
§ 6.1 Conclusions	83
§ 6.2 Prospect	85
References	86
Publications.....	89
Acknowledgements.....	90

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 绪 言

§ 1.1 焊接加工技术发展概况及其特点

焊接技术自发明至今已有百余年历史，虽然它在工业中应用的时间并不长，但发展却非常的迅速，作为一种重要的金属加工工艺，它几乎已能解决当前工业中一切重要产品生产制造的需要。现代焊接技术的发展始于十九世纪末二十世纪初，由于其灵活性及可靠性，焊接技术的发展越来越快，各种焊接件也越来越多地被应用到工业生产当中。据统计，大多数发达国家利用焊接加工的钢材量已超过钢材产量的一半。随着科学技术的不断进步，它已经发展成为一门独立的科学，许多新的焊接方法也不断涌现。如今，焊接技术已经广泛地应用于锅炉与压力容器、建筑结构、汽车、船舶、航空航天、电力、石油化工、电子、海洋开发等各个领域，在许多工业部门的金属结构中代替了过去一直使用的锻铸和铆接，不仅大大简化了工艺，也降低了成本^[1]。

金属焊接是指采用适当的手段，使两种或两种以上的材料（同种或异种）通过原子或分子之间的结合和扩散形成永久性联接的工艺过程^[1]。因此，焊接结构可以在同一个零件上，根据不同要求采用不同的材料或分段制造来简化工艺，具有一些用别的工艺方法难以达到的优点。简而言之，焊接结构具有以下一些主要特点^[2, 3]：

1. 焊接可以将不同类型、不同形状尺寸的材料连接起来而不需要附加的连接件，可以使金属结构中材料的分布更加合理。焊接接头通过原子间的结合力实现，刚度大，整体性能好，其强度一般也能达到与母材相同，在外力作用下不像机械结构（如铆接、销子链接等）那样产生较大的变形，而且，焊接结构具有良好的气密性、水密性。

2. 虽然焊接接头的整体性能良好，但由于焊缝金属的成分和组织与母材金属不同，以及焊接接头所经受的不同热循环和热塑性应变循环，焊接接头的不同区域具有不同的性能，形成了一个不均匀体，它的不均匀程度远远超过铸件和锻件。另外，也正是由于这种整体性，使得焊接结构会在外力的作用下产生整体变形，因此焊缝的形状和布置就必然会影晌应力的分布，使应力集中在较大的范围内变

化。焊接区域的不均匀性和应力集中的情况对结构的力学行为（特别是脆性断裂及疲劳）有着很大的影响。

3. 绝大多数焊接方法都采用局部加热，故不可避免地会产生内应力和变形。焊接时的应力和变形不但可能引起工艺缺陷，而且在一定条件下将影响结构的承载能力以及加工精度和尺寸稳定性。因此，在设计和施工时充分考虑焊接应力和变形这一特点是十分重要的。

4. 焊接加工一般不需要大型、贵重的设备，是一种投资少、见效快的方法，既适合大批量生产，也适合小批量生产，而且产品结构变化时，设备基本可以不变。

§ 1.2 焊接热过程对焊件的影响

焊接是一个局部快速加热到高温，随后快速冷却的过程。焊接过程中的物理现象包括焊接时的热传导、金属的熔化与凝固、熔融过程的相变、焊接应力和变形等。正是由于焊接热源具有局部集中、瞬时运动的特点，在焊接过程中就会形成极不均匀的温度场，这种温度场分布反映了复杂的焊接热过程，它不仅直接通过热应力、热应变，而且还间接通过随金属状态和显微组织变化引起的相变、应变决定了焊接残余应力，以及焊缝熔化、结晶、变形、应力等状况^[4-6]。温度场、应力和变形场以及显微组织状态场三者之间的关系如图 1-1 所示^[7]。图中，箭头表示的是相互作用：实箭头表示强烈的作用；虚箭头表示较弱的影响（经常在工程上可忽略其关联）。

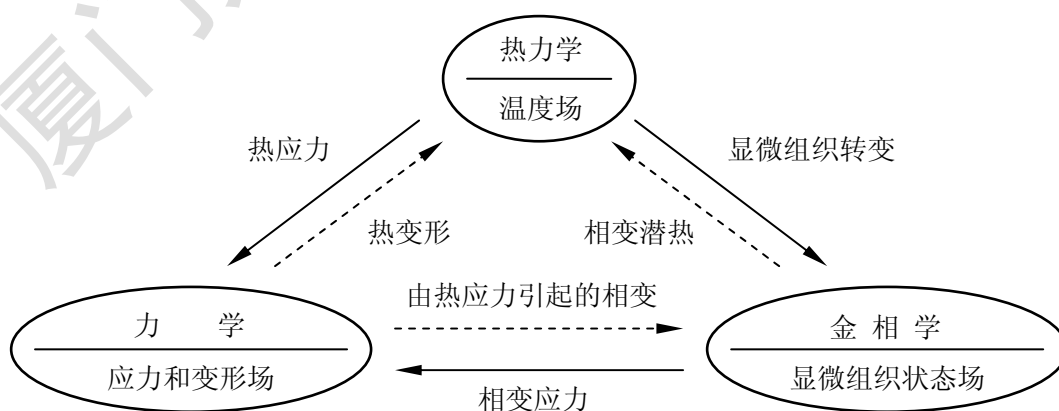


图 1-1 温度场、应力和变形场及显微组织状态场的分解和相互影响

当材料受热不均时,会产生温度应力,又称热应力。在焊接过程中,焊接区以远高于周围区域的速度被急剧加热,并局部熔化,导致材料内部某些部分具有很大的温度梯度。在焊接过程中不均匀的焊接温度场使得焊接区的材料受热膨胀,但是这种热膨胀受到周围较冷区域的约束,产生热应力;而周围较冷区域在阻碍焊接区膨胀的同时也受到其反作用而产生受拉热应力。这些热应力是在没有外力作用下出现的,且拉应力和压应力在构件内相互平衡,就构成了内应力。如果温度应力低于材料的屈服极限,在构件里不产生塑性变形,那么,当构件的温度恢复到原始的均匀状态后,热应力便随之消失。反之,如果热应力超过屈服极限,焊接区会形成塑性的热压缩;冷却后,该区域会比周围区域相对缩短、变窄或减小,这个区域就呈现拉伸应力,周围区域则承受压缩应力。这种内应力是温度均匀后残存在物体中的,因此称之为残余应力。另外,当焊接过程对金属构件局部不均匀加热和冷却而导致金属组织发生变化,即相变,伴随这种相变所出现的体积变化将产生新的内应力。当温度恢复到原始状态后,如果相变的产物还保留下来,那么物体内部就产生相变应力,它也属于残余应力的范畴。存在焊接残余应力时,也会产生暂时的或者永久的焊接变形,包括位移或回转。^[1、2、7]

§ 1.3 数值模拟技术及有限元法在焊接技术中的应用

如今,焊接已经成为现代制造业中必不可少的工艺方法,然而在实际操作中,人们往往只是凭借经验或者通过一系列的实验来获取可靠而经济的焊接结构,特别是在手工电弧焊中。随着科学技术的高速发展,新材料、新能源以及新的工程结构不断涌现,此时没有多少经验可以凭借,如果只是依靠实验方法积累数据不仅要花费大量的时间和经费,而且任何尝试的失败,都有可能造成重大的经济损失。因此,采用一种适当的技术来对焊接进行评价和预测就变得极为重要。

随着现代科学技术的发展,以数值分析为基础的数值模拟技术的地位显得越来越重要。在工程中,有许多问题都可以归结为某些特定的微分方程组,然而,只有在很简单的情况下并且作出许多简化的假定后,才有可能求得方程组的解析解。在实际情况下,由于问题多种多样,并且边界条件十分复杂,用解析法来求解这类微分方程是非常困难的。针对这种情况,科学家们转而寻求它的近似解法,于是他们在数学模型的基础上,采用数值分析来专门研究数学问题的数值解法

[8-10]。数值解法在工程学的一些领域中已被视为与实验同等的重要，因为许多工程系统的性能和复杂程度越来越高，单纯的实验已难以使严峻的状况重现；其次，有些问题只有使用数学模型才能明了其状况^[8]，比如对系统的可靠性分析，因为故障的出现是极少有的现象，难以依靠多数实验结果作出处理来确定复杂系统的可靠程度，这时，建立相对应的数学模型就显得极为重要；再者，电子计算机的性能大大提高和普及，使得对复杂结构及其所处环境最大程度的精确模拟和海量计算成为可能，采用数值实验具有很大的优越性，能够在提高分析效率的同时也大大降低实验成本，提高经济效益。

长期以来，焊接科技工作者们也一直不断地将数值模拟技术引入到焊接过程的研究中，使焊接过程的分析逐步从解析法过渡到有限差分法和有限元法，从而使得这门技术也不再仅仅依靠人们的技艺和经验，而是使焊接工艺过程中的许多现象不仅可以从本质上进行理论解释，还可以进行定量分析、模拟和理论预测^[11-19]。目前，焊接过程模拟的发展方向在于建立精确的物理模型，获得准确的结果，在充分分析焊接过程物理本质的基础上，优化工艺。但是，由于物理本质的复杂性，焊接过程模拟技术的发展一直比较缓慢，远远落后于实际生产需要和制造业其他领域仿真技术的发展。

有限元法作为求解复杂工程问题的一种近似数值解法，由于其具有求解复杂问题的能力并能够描述瞬时和全过程的现象，在焊接过程的数值模拟分析中逐渐占据了主导地位，并且分析规模逐步从一维模型扩展到二维模型，甚至三维模型。有限元法——Finite Element Method 是在电子计算机的基础上发展起来的一种有效的数值方法，它起源于二十世纪 50 年代航空工程中飞机结构的矩阵分析^[8-10]。二十世纪 70 年代，在英国科学家 O. C. Zienkiewicz 等人的努力下，有限元法的应用被推广到了热传导、电磁场、流体力学等领域。经过多年的发展，目前有限元法几乎可以用来求解所有的连续介质和场问题，包括静力问题和与时间有关的变化问题以及振动问题。目前，有限元法已成为工程设计中不可或缺的一种重要方法，在大型结构作用力分析、变形分析、失效分析、传热分析、电磁场分析、流体动力分析等方面扮演着越来越重要的角色。由此，许多大型有限元分析软件也就应运而生，例如：ANSYS、MSC、Abaqus、Marc、Adina 等等。在焊接领域，有限元法已经广泛地用于焊接热传导、焊接热弹塑性应力和应变分析、焊接结构的断

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库